

# ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА УЛАВЛИВАНИЯ ШЛАКА В ТОПКЕ ОТКРЫТОГО ТИПА С ЖИДКИМ ШЛАКОУДАЛЕНИЕМ

А.В. Старченко, А.С. Заворин, С.В. Красильников

Томский политехнический университет

E-mail: ghost@tpu.ru

*Приводится описание математической модели и результаты численного расчета доли минеральной части угля, улавливаемой в топке, применительно к технологии факельного сжигания с удалением шлака в расплавленном состоянии. Рассмотрено влияние некоторых конструктивных и режимных факторов на эффективность шлакоулавливания.*

## Введение

Прогнозирование поведения минеральной части углей в трактах котельных агрегатов является одной из актуальных задач для теплоэнергетики, так как с этим связано обеспечение надежной работы котлов по условиям предотвращения золowego износа или отложений на тепловоспринимающих поверхностях, поддержания маневренности и несения нагрузки, оптимальных условий для процессов золоочистки дымовых газов.

При изучении процессов в котле, определяемых свойствами минеральной части угля, моделирова-

ние условий шлакообразования и компьютерный расчет коэффициента шлакоулавливания являются ключевыми, поскольку от результата исследования зависит надежность моделирования взаимодействия минеральной составляющей топлива с поверхностями нагрева в топке и газовом тракте. Учитывая определяющую роль аэродинамики для организации пылеугольного факельного сжигания в энергетических котлах, необходимо исследовать шлакообразование в комплексе с моделированием двухфазных течений, тепло- и массообмена и горения. Для этого применен пакет прикладных программ FIRE 3D [1], развитый на основе програм-

много комплекса CHAIF [2] и использующий в качестве условия улавливания [3] столкновение частицы со стенкой, покрытой слоем расплава.

### Математическая модель

В основу модели положен метод, совмещающий эйлеров и лагранжев подходы для описания движения и теплообмена реагирующих газов и взвешенных частиц в топке парового котла [2]. При этом общие уравнения движения, теплообмена и горения в газовой фазе описаны на основе эйлерова способа представления, т.е. используются пространственные уравнения баланса массы, импульса, концентраций газовых компонентов и энергии для газовой смеси. Лагранжев подход применяется для описания движения и тепломассообмена одиночных частиц топлива вдоль их траекторий с учетом обратного влияния дисперсной фазы на несущую среду. Турбулентные характеристики газа рассчитываются с использованием двухпараметрической "k-ε" модели турбулентности, также учитывающей влияние движущихся частиц в несущем потоке. Радиационный теплообмен представляется в рамках P1-приближения метода сферических гармоник, который показывает хорошие результаты применения к пылеугольным топкам [2].

Полидисперсность частиц топлива учитывается путем выделения основных фракций по функции Розина-Раммлера, определяющей расщепление характеристики угольного топлива после помола. Поскольку пылеугольное топливо перед сжиганием подвергается сушке, считается, что в топку поступают частицы, не содержащие влаги.

Перемещаясь по топочному объему, угольные частицы нагреваются за счет радиационно-конвективного теплообмена, начинается выход летучих компонентов, их воспламенение и горение, а также догорание коксового остатка. Предполагается, что газовая среда в топке может состоять из химически инертных молекулярного азота N<sub>2</sub>, двуокиси углерода CO<sub>2</sub>, паров воды H<sub>2</sub>O, а также реагирующих O<sub>2</sub>, CO и летучих.

В этом случае математическая модель включает следующие блоки [4].

#### 1) Газовая фаза

##### Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = J_{vap} + J_{char}.$$

##### Уравнения баланса массы газовых компонентов

$$\frac{\partial \rho C_{N_2} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_i}{Sc_i} \frac{\partial C_{N_2}}{\partial x_i} \right);$$

$$\frac{\partial \rho C_{O_2} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_i}{Sc_i} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x_i} \right) - \beta_{vol} J_{vol} - \beta_{CO} J_{CO} - J_{char}^{O_2};$$

$$\frac{\partial \rho C_{vol} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_i}{Sc_i} \frac{\partial C_{vol}}{\partial x_i} \right) + \alpha_{vap} J_{vap} - J_{vol};$$

$$\frac{\partial \rho C_{CO} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_i}{Sc_i} \frac{\partial C_{CO}}{\partial x_i} \right) + J_{char}^{CO} - J_{CO};$$

$$\frac{\partial \rho C_{CO_2} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_i}{Sc_i} \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x_i} \right) + J_{char}^{CO_2} + (1 + \beta_{CO}) J_{CO};$$

$$\sum_{j=N_2, O_2, vol, CO, CO_2, H_2O} C_j = 1,$$

$$(C_{N_2} + C_{O_2} + C_{vol} + C_{CO} + C_{CO_2} + C_{H_2O} = 1).$$

##### Уравнение движения

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_i} = & - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \right. \\ & \left. - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left[ \rho k + (\mu + \mu_T) \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right] \right] + \rho g_j + F_j; \\ & j = 1, 2, 3. \end{aligned}$$

##### Уравнение энергии

$$\frac{\partial \rho U_i T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left[ \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right] c \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_{vol} J_{vol} + Q_{CO} J_{CO} - \frac{\partial q_i^{rad}}{\partial x_i} + \Theta.$$

##### Уравнение состояния

$$\rho = \frac{p}{R_0 T \left[ \frac{C_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{C_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{C_{vol}}{M_{vol}} + \frac{C_{CO}}{M_{CO}} + \frac{C_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{C_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right]}.$$

Здесь  $\rho$  – плотность газовой смеси;  $U_i (i=1,2,3)$  – компоненты скорости газа;  $x_i (i=1,2,3)$  – декартовы координаты;  $J_{vap}$ ,  $J_{char}$  – массовые скорости выхода летучих при пиролизе угольного топлива и догорания образовавшегося коксового остатка (гетерогенные реакции); по повторяющимся индексам производится суммирование от 1 до 3 (соглашение Эйнштейна);  $C_j$  – концентрации газовых компонентов;  $\mu_i$ ,  $Sc_i$  – турбулентная вязкость газа и турбулентное число Шмидта ( $Sc_i = 0,9$ );  $J_{vol}$  – массовая скорость горения летучих, зависящая от скорости химической реакции горения углеводородов  $C_M H_N - J_{vol, ch}$  и интенсивности турбулентного смешения реагирующих компонентов  $J_{vol, dij}$ ;  $\beta_{vol}$  – количество O<sub>2</sub>, необходимое для сгорания 1 кг летучих;  $k$ ,  $\varepsilon$  – энергия турбулентности газа и скорость ее диссипации;  $J_{CO}$  – массовая скорость реакции горения  $CO + 1/2 O_2 = CO_2$ ;  $q_i^{rad}$  – компоненты вектора радиационного теплового потока;  $\Theta$  – интенсивность теплообмена между несущей средой и частицами. В уравнении энергии моделируется перенос тепла за счет конвекции, термического излучения, поступления тепла вследствие горения летучих и CO, а также обмен теплом с дисперсной фазой;  $M_j$  – молекулярные веса компонентов газовой смеси;  $R_0$  – универсальная газовая постоянная.

#### 2) Дисперсная фаза

Моделирование движения частиц ведется с использованием лагранжева подхода. При этом весь спектр пылеугольных частиц, поступающих в топочную камеру, разбивается на  $N$  групп по размерам на

основе зависимости Розина-Раммлера (или вручную на основе данных ситового анализа фракций угольной пыли после мельниц). При этом считается, что поведение каждой группы частиц может быть охарактеризовано поведением ее представителя – пробной одиночной частицы. Таким образом свойства, которыми в настоящий момент времени обладает частица-маркер, распространяются на все частицы группы, которую представляет частица-маркер. Для расчета параметров, характеризующих состояние частицы-маркера, используется следующая система обыкновенных дифференциальных уравнений.

Уравнения движения частицы-маркера  $i$ -ой группы [4]

$$\frac{d\tilde{U}_j^i}{dt} = -\frac{\tilde{U}_j - \tilde{U}_j^i}{\tau_i} + g_j; \quad j = 1, 2, 3,$$

$$\tau_i = \frac{4\rho_p d_{pi}}{3c_{D_i} \rho |\tilde{U}_j^i - \tilde{U}_j|}; \quad c_{D_i} = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_i} (1 + 0,15 \text{Re}_i^{0,687}); & \text{Re}_i \leq 1000; \\ 0,44; & \text{Re}_i > 1000; \end{cases}$$

$$\text{Re}_i = \frac{\rho \sqrt{\sum_{j=1}^3 (\tilde{U}_j^i - \tilde{U}_j)^2} d_{pi}}{\mu}.$$

где  $\tilde{U}_{ij}$  – компоненты скорости частиц;  $\tilde{U}_j = U_j + U'_j$  – компоненты актуальной скорости газа;  $\rho_p$  – плотность угля;  $d_{pi}$  – размер частиц  $i$ -ой группы;  $c_{D_i}$  – коэффициент сопротивления частиц;  $\tau_i$  – время их релаксации; турбулентные пульсации скорости газа  $U'_j$  выбираются случайным образом на основе принятого нормального распределения Гаусса со среднеквадратичным отклонением, равным  $2/3k$ , т.е.  $U'_j = \xi_j \sqrt{\frac{2}{3}k}$ ,  $|\xi_j^2| = 1$   $k$  – энергия турбулентности. Значение  $\xi_j$  изменяется с помощью датчика случайных чисел в процессе движения частицы в исследуемом пространстве через отрезок времени

$$\tau_T = \min \left[ \frac{L}{\sqrt{\frac{2}{3}k}}, \frac{L}{|\tilde{U}_j^i - \tilde{U}_j|} \right], \quad \text{где } L = \frac{k^{1,5}}{\varepsilon} \text{ – масштаб турбулентности.}$$

Компоненты скорости частиц, не отмеченные волной, являются средними скоростями,  $U'_j$  – турбулентными пульсациями. Эти и другие параметры полета частиц-маркеров осредняются после расчета достаточного количества траекторий из одной точки.

Уравнения тепломассообмена и горения частиц

$$\frac{dm_i}{dt} = -\dot{M}_i^{\text{vap}} - \dot{M}_i^{\text{char}},$$

$$m_i c_p \frac{dT_i}{dt} = Q_{\text{char}} \dot{M}_i^{\text{char}} + \pi d_{pi}^2 \left[ \alpha_{\text{conv}} (T - T_i) + \varepsilon_p (H - 4\sigma T_i^4) \right] - Q_{\text{vap}} \dot{M}_i^{\text{vap}}.$$

Здесь  $m_i$  – масса одиночной частицы с диаметром  $d_{pi}$ ;  $c_p$  – теплоемкость угля;  $Q_{\text{char}}$  – теплота сгорания кокса;  $Q_{\text{vap}}$  – тепло, необходимое для выхода летучих;  $\varepsilon_p$  – степень черноты частицы;  $\alpha_{\text{conv}}$  – коэффициент конвективной теплоотдачи одиночной частицы ( $\alpha_{\text{conv}} d_{pi} / \lambda = 2 + 0,459 \text{Re}_i^{0,55} \text{Pr}_i^{0,33}$ );  $\lambda = \mu(c/\text{Pr})$  – коэффициент теплопроводности газа;  $T_i$  – температура  $i$ -ой частицы угля.

При определении массовой скорости выхода летучих  $\dot{M}_i^{\text{vap}}$  используется соотношение (закон Аррениуса),

$$\dot{M}_i^{\text{vap}} = k_{\text{vap}} \exp \left( -\frac{E_{\text{vap}}}{RT_i} \right) f_{v0} m_{oi},$$

где  $m_{oi}$  – начальная масса сухой частицы с диаметром  $d_{pi}$ ;  $f_{v0}$  – массовая доля летучих в сухом угле;  $k_{\text{vap}}$  – предэкспонент;  $E_{\text{vap}}$  – энергия активации.

Скорость горения коксового остатка зависит от кинетической скорости химической реакции горения углерода и от интенсивности диффузии окислителя к поверхности частицы,

$$\dot{M}_i^{\text{char}} = \pi d_{pi}^2 \rho C_{\text{O}_2} \frac{K_K K_D}{K_K + K_D},$$

$$K_K = k_{\text{char}} \exp \left( -\frac{E_{\text{char}}}{RT_i} \right).$$

Для  $K_D$  используется зависимость

$$K_D = \frac{D_{\text{O}_2}}{d_{pi}} (2,0 + 0,16 \text{Re}_i^{0,667});$$

$$D_{\text{O}_2} = 16 \cdot 10^{-6} \left( \frac{T}{273} \right)^{1,9}.$$

### 3) Влияние дисперсной фазы на газовую

В приведенной выше математической модели необходимо определить члены в уравнениях переноса, которые представляют влияние частиц на характеристики несущей среды:  $J_{\text{vap}}$ ,  $J_{\text{char}}$ ,  $F_j$ ,  $\Theta$ ,  $S_k$ ,  $S_H$ . В использованном здесь смешанном эйлерово-лагранжевом способе моделирования аэродинамики, тепломассообмена и горения в камере сгорания котлоагрегата учет обратного влияния частиц на газовую фазу выполняется следующим образом.

Поскольку решение уравнений будет осуществляться численно, то рекомендуется использовать метод контрольного объема, согласно которому область исследования разбивается на конечное число непересекающихся объемов. Значения искомых функций внутри каждого объема могут считаться однородными. При последовательном расчете траекторий движения частиц-представителей каждой группы с учетом изменения их массы, скорости, положения и температуры для каждого контрольного объема вычисляются значения  $J_{\text{vap}}$ ,  $J_{\text{char}}$ ,  $F_j$ ,  $\Theta$ ,  $S_k$ ,  $S_H$  по следующим формулам [4].

$$J_{\text{vap}} = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i^{\text{vap}}}{m_{oi}} \dot{m}_{oi}, \quad J_{\text{char}} = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i^{\text{char}}}{m_{oi}} \dot{m}_{oi},$$

$$F_j = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{U_j^i - U_j}{\tau_i} \dot{m}_{oi} t_i - \frac{\Delta m_i}{m_{oi}} \dot{m}_{oi} U_j^i \right]; \quad j = 1, 2, 3;$$

$$\Theta = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[ Q_{\text{char}} \Delta m_i^{\text{char}} + \bar{m}_i c_p \Delta T_i - Q_{\text{vap}} \Delta m_i^{\text{vap}} \right] \frac{\dot{m}_{oi}}{m_{oi}} -$$

$$-\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[ c_p T_i + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 (U_j - U_j^i)^2 \right] \dot{m}_{oi} + \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\dot{m}_{oi} t_i}{\tau_i} \sum_{j=1}^3 (U_j - U_j^i)^2 +$$

$$+ \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\pi d_{pi}^2}{m_{oi}} \varepsilon_p (H - 4\sigma T_i^4) \right] \dot{m}_{oi} t_i;$$

$$S_k = \frac{2k}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\dot{m}_i t_i}{\tau_i + T_L}, \quad T_L = \frac{0,41k}{\varepsilon},$$

$$S_H = \frac{\varepsilon_p}{V} \sum_{i=1}^N \pi d_{pi}^2 (4\sigma T_i^4 - H) \frac{\dot{m}_{oi}}{m_{oi}} t_i.$$

Здесь  $S_H$  – поглощение излучения топливными частицами,  $S_k$  – дополнительная диссипация турбулентной энергии, обусловленная влиянием дисперсной фазы,  $N$  – число частиц-маркеров, прошедших через рассматриваемый контрольный объем, имеющий размер  $V$ ;  $\Delta m_i = \Delta m_i^{vap} + \Delta m_i^{char}$  – изменение массы  $i$ -ой частицы в процессе выхода летучих и горения коксового остатка за время прохождения ею данного контрольного объема;  $m_{oi}$  – начальная масса частицы-маркера;  $\dot{m}_{oi}$  и  $\dot{m}_i$  – начальный и текущий массовые расходы частиц данной фракции;  $t_i$  – время прохода  $i$ -ой частицы через контрольный объем  $V$ ;  $\bar{m}_i$  – средняя масса  $i$ -ой частицы в контрольном объеме;  $\Delta T_i$  – изменение температуры частицы в контрольном объеме  $V$ .

#### 4) Шлаковая пленка

Учет образования и движения шлаковой пленки осуществляется с использованием решения Маршака [5], распространенного на случай пространственных топочных процессов. Согласно предложенному подходу температура поверхности шлаковой пленки определяется из уравнения теплового потока на поверхности

$$q_{\Pi} = \sigma \varepsilon_T (T_{\Phi}^4 - T_{\Pi}^4) + \alpha (T_{\Phi} - T_{\Pi}),$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\varepsilon_T$  – степень черноты топки,  $T_{\Phi}$  – локальная температура в топке,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $T_{\Pi}$  – температура поверхности движущейся шлаковой пленки.

Решение задачи об определении средней по сечению пленки скорости имеет следующий вид [5]

$$\bar{w}_X = \frac{\rho_{\Pi} g \delta_{\Pi}^2}{\mu_0 \left( \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} \right)^3} \left[ \frac{\tau_g}{\rho_{\Pi} g \delta_{\Pi}} \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} \left( \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - 1 \right) + \right. \\ \left. + 2 \left( \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - 1 \right) - 2 \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - \left( \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

здесь  $\rho_{\Pi}$  – плотность шлаковой пленки,  $\mu_0$  – относительная вязкость шлака на границе перехода в пластичное состояние,  $\mu_{\Pi}$  – вязкость шлака при температуре  $T_{\Pi}$ ;  $\mu_{\Pi} = \mu(T_{\Pi}) = \mu_0 \left( \frac{T_{\Pi}}{T_0} \right)$ ;  $\mu(T) \frac{dw_X}{dz} = \tau_g$  – касательное напряжение на границе шлаковой пленки.

С другой стороны, уравнение изменения массы шлаковой пленки на участке "Up-Down" (верх-низ ячейки) в интегральной форме записывается:

$$(\rho_{\Pi} \bar{w}_X \delta_{\Pi})_{Down} - (\rho_{\Pi} \bar{w}_X \delta_{\Pi})_{Up} = SW, \quad (2)$$

где  $SW$  – интенсивность осаждения шлаковых частиц на стенку или в пленку из топочного пространства на рассматриваемом участке поверхности топки. Из (1) и (2) получим:

$$\delta_{\Pi} = \left\{ \frac{(\rho_{\Pi} \bar{w}_X \delta_{\Pi})_{Down} \cdot \mu_0 \left( \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} \right)^3}{\rho_{\Pi}^2 \left[ \frac{\tau_g}{\rho_{\Pi} g \delta_{\Pi}} \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} \left( \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - 1 \right) + \right.} \right. \\ \left. \left. + 2g \left( \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - 1 \right) - 2g \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} - g \left( \ln \frac{\mu_0}{\mu_{\Pi}} \right)^2 \right] \right\}^{1/3}. \quad (3)$$

Таким образом, порядок расчета температуры шлаковой пленки следующий. Начиная с верхних сечений топки, где не образуется шлаковая пленка, из (2) получаем  $\delta_{\Pi}=0$  (т.к.  $SW=0$ ). Если же осаждение частиц есть, то расчет производится по вышеприведенным формулам. Заметим, что формулу (3) легко можно распространить на случай наклонной поверхности, для чего следует заменить  $g$  на  $g \sin \alpha$ , где  $\alpha$  – острый угол между горизонтом и поверхностью.

#### Результаты вычислительных экспериментов

Расчеты выполнены для топки с жидким шлакоудалением котла БКЗ-220-100ЖШ, по которой имеется обширный банк данных, полученных в ходе натурных экспериментов и физического моделирования аэродинамики [6]. Топка открытого типа с прямым вдуванием пыли имеет четыре плоскоструйные горелки, установленные на фронтальной стене с наклоном к горизонту и разворотом к продольной оси котла (на  $15^\circ$  для крайних и на  $7^\circ$  для средних горелок). За счет взаимной ориентации горелок и стен в нижней части топки создается своеобразное взаимодействие плоских струй, приводящее к возникновению в зоне активного горения горизонтальной вихревой структуры факела, названной разработчиками "аэрошатровой".

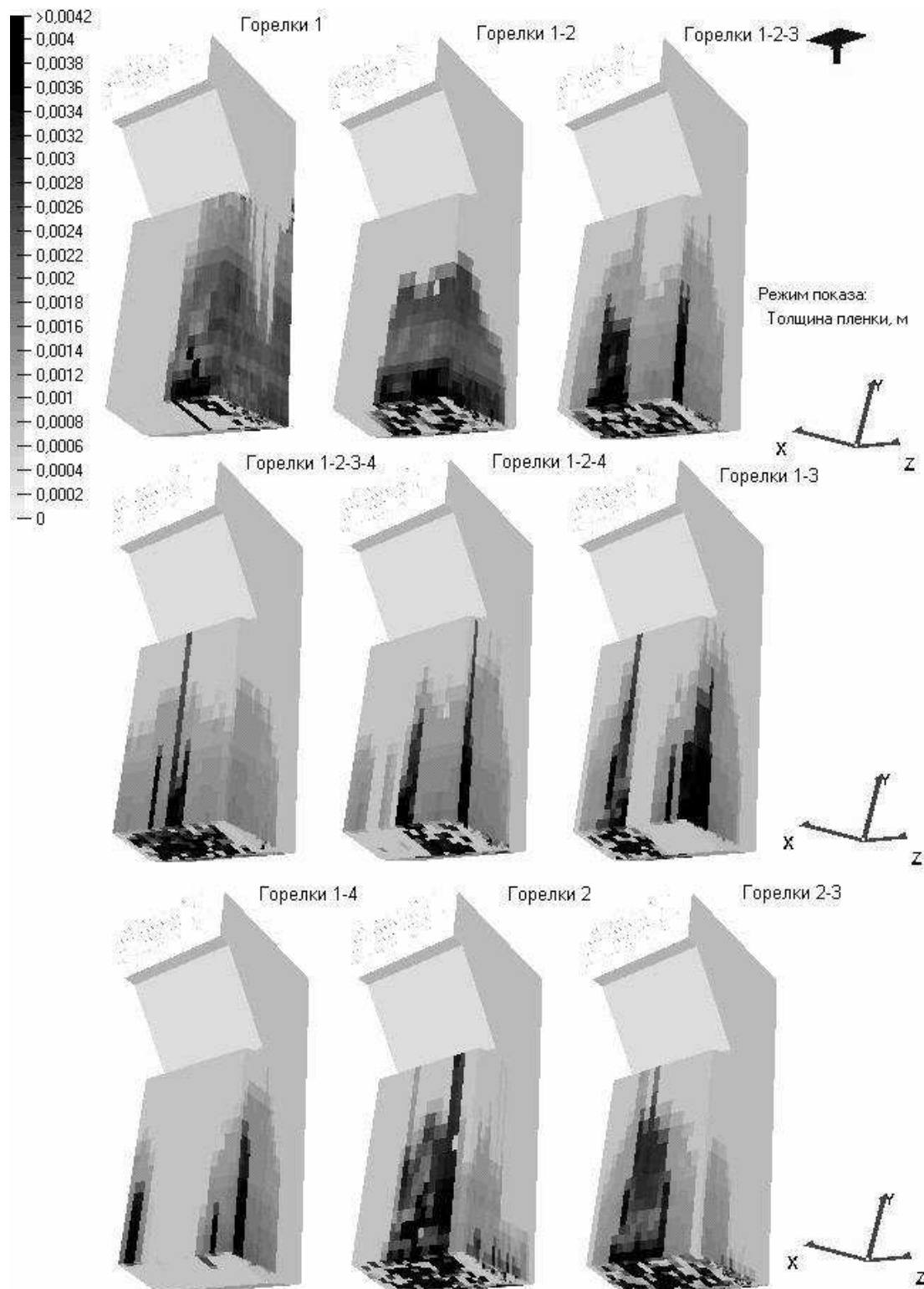
Исходя из вариативности воспроизведения условий работы топочной камеры, вычислительная оценка осаждения шлака выполнена несколькими этапами: 1) исследовано влияние перераспределения угольной пыли по горелкам, а также изменение вертикального угла оси горелок; 2) проведен анализ роли дисперсного состава топлива; 3) исследовано влияние изменения геометрии топки путем установки дополнительного пережима разной глубины напротив верхнего среза горелок. При этом базовым для сравнения вариантов принят режим несения полной нагрузки при работе всех четырех горелок (сочетание 1-2-3-4), наклоне горелок на  $15^\circ$  и при одноплоскостном исполнении противоположной горелкам стены топки. Оценка коэффициента шлакоулавливания произведена по осаждению частиц в пределах футерованных экранов, ограничивающих объем камеры сгорания.

Условия подачи аэросмеси в топку оказывают значительное влияние на процессы горения, распределения тепла по теплообменным поверхностям, осаждения недогоревших частиц и их золовых остатков на ограждающих поверхностях топочной каме-

ры. Трехмерная визуализация распределения шлакоосаждения по стенам при различных вариантах сочетания работающих горелок показана на рис. 1.

Можно видеть, что наибольшая локализация осаждения шлака в камере сгорания достигается при рассредоточенном вводе угольной пыли в топку (в ра-

боте 3 или 4 горелки). В базовом режиме (4 горелки) расчетный коэффициент шлакоулавливания составляет 0,258. При обеспечении нагрузки котла тремя горелками при варианте с двумя крайними и одной средней (сочетание 1-2-4) коэффициент шлакоулавливания уменьшается до 0,245 за счет увеличения вы-



**Рис. 1.** Визуализация распределения шлакоосаждения в топке котла БКЗ-220-100 ЖШ при разных сочетаниях задействованных горелок

носа частиц из камеры сгорания через пространство вблизи неработающей горелки. Вариант с большей асимметрией (сочетание 1-2-3) увеличивает коэффициент шлакоулавливания до 0,346 за счет концентрирования области аэродинамического взаимодействия факела с тыльным экраном с соответствующим увеличением толщины шлаковой пленки.

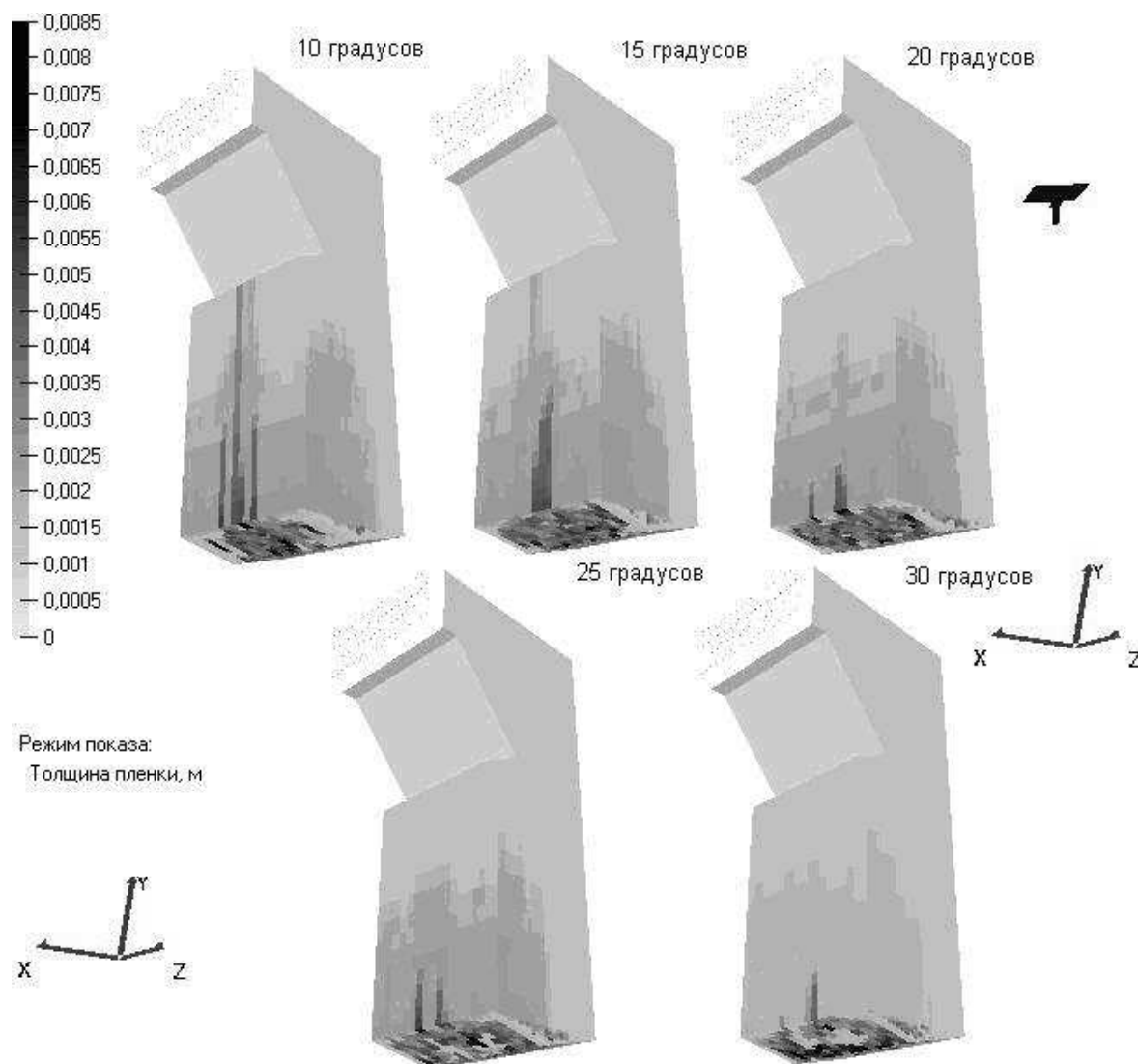
Варианты визуализации с двумя и одной горелкой (сочетания 1, 2, 1-2, 1-3, 1-4, 2-3) являются гипотетическими с точки зрения реальности несения котлом номинальной нагрузки, однако информативны для сравнительного анализа режимов работы с неполным составом углеразмольных мельниц и для выявления участков открытых экранов, потенциально опасных по условию шлакования.

Наименьший коэффициент шлакоулавливания имеет режим работы с крайними горелками (сочетание 1-4), однако за счет удлинения траектории факела обеспечивается более полное выгорание топлива. По сравнению с этим при прочих равных условиях

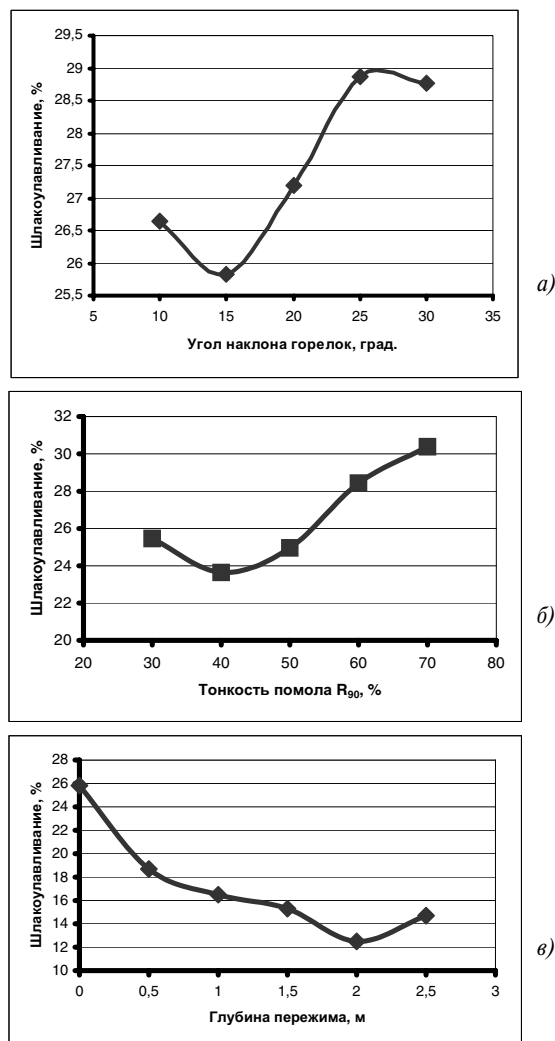
коэффициент шлакоулавливания возрастает более чем в два раза при работе с одиночной горелкой или с двумя центральными горелками (сочетание 2-3).

Влияние угла наклона горелок вниз от горизонтали в визуализированном представлении результатов сказывается на сокращении зоны осаждения и смещении ее в подовую часть топки (рис. 2).

В целом это сопровождается тенденцией увеличения коэффициента шлакоулавливания (рис. 3, а). Однако в области угла наклона  $20^\circ$  и более происходит повышение сепарации недогоревших коксовых частиц на под топку с внедрением их в шлаковую пленку. На практике это приводит к развитию восстановления железа в расплаве шлака и "металлизации" пода с угрозой взрывоопасности системы механизированного удаления шлака. Уменьшение угла наклона до  $10^\circ$  также несколько увеличивает коэффициент шлакоулавливания за счет появления эффекта "наброса" на противоположный экран при той же дальности горелочных струй.



**Рис. 2.** Визуализация распределения шлакоосаждения в топке котла БКЗ-220-100 ЖШ при разных углах наклона горелок к горизонту



**Рис. 3.** Изменение коэффициента шлакоулавливания (%) от конструктивных и режимных факторов топочного процесса: а) от угла наклона горелок; б) от тонкости помола угольной пыли (по остатку на сите  $R_{90}$ ); в) от глубины пережима на противоположном горелкам экране

Диапазон управляющего воздействия на шлакоулавливание за счет изменения тонкости помола угля в эксплуатационном диапазоне работы углеразмольных мельниц лежит между значениями ко-

эффициента шлакоулавливания от 0,235 до 0,304 (рис. 3, б).

В связи с обсуждением целесообразности существенного изменения принципов организации аэродинамики топки путем реконструкции противоположного горелкам экрана с обустройством и нахождением оптимальной глубины аэродинамического пережима [7] показано (рис. 3, в), что увеличение его размера приводит к уменьшению коэффициента шлакоулавливания вдвое (от 0,258 до 0,125).

Лишь при перекрытии сечения топки пережимом на 30 % намечается последующее повышение коэффициента шлакоулавливания до 0,147. Выявленные эффекты связаны со сложной аэродинамикой, формирующейся вблизи пережима при различных его размерах. В частности, дополнительный пережим разбивает горелочные струи на два потока, один из которых уходит вверх над пережимом, другой – в нижнюю часть топки. При увеличении глубины пережима над ним вплоть до выходного окна топки отчетливо проявляется обширная рециркуляционная зона, осаждение частиц на стенки камеры сгорания уменьшается, зона повышенных температур (зона горения) смещается к низу топки, наблюдается рост скорости газодисперсного потока над подом топки. Установка дополнительного пережима уменьшает общий объем зоны реагирования горючей смеси, но увеличивает теплообменную поверхность, и при меняющейся аэродинамической картине это приводит лишь к незначительному уменьшению температуры на выходе из топки.

### Заключение

На основании выполненного численного анализа коэффициента шлакоулавливания применительно к открытой топке с жидким шлакоудалением, прямым вдуванием угольной пыли и фронтальным расположением плоскофакельных горелок показаны диапазоны управляющего воздействия на осаждение шлака в камере сгорания таких режимных факторов как сочетания включенных в работу горелок и тонкость помола угольной пыли, а также некоторых конструктивных характеристик камеры сгорания – угла наклона горелок и глубины пережима противоположного горелкам экрана.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старченко А.В., Заворин А.С., Красильников С.В. Применение пакета FIRE 3D к анализу процессов шлакоулавливания в пылеугольных топках // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 2. – С. 152–157.
2. Бубенчиков А.М., Старченко А.В. Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах. – Томск: Изд-во ТГУ, 1998. – 236 с.
3. Заворин А.С., Старченко А.В., Красильников С.В. Оценка степени шлакоулавливания пылеугольных топков // Сопряженные задачи механики и экологии: Матер. Междунар. конф. – Томск: Изд-во ТГУ, 1998. – С. 109–110.
4. Starchenko A.V., Krasilnikov S.V. A Numerical Investigation of Particle Deposition in Pulverized Coal-Fired Furnaces // Two-Phase Flow Predictions. Proc. of the 10<sup>th</sup> Workshop. Merseburg, April 9–12, 2002. – P. 237–246.
5. Маршак Ю.Л., Рыжаков А.В. Шиповые экраны топков паровых котлов. – М.: Энергия, 1969. – 240 с.
6. Федецкий И.И. Исследование процессов в минеральной части назаровского угля в топке с плоскими параллельными струями. – Дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТПИ, 1980. – 255 с.
7. Федецкий И.И. Модернизация аэродинамической структуры факела и топочного процесса котла БКЗ-220-100 ЖШ // Исследование и конструирование котлов: Межвузовский научно-технический сборник. – Томск: Изд-во ТПУ, 1993. – С. 39–45.